



Laboratory experiment of evolution of rip current according to the duration of successive ends of breaking wave crests

Choi, Junwoo^{a*}

^aResearch Fellow, Department of Land, Water and Environment research, Korea Institute of Civil Engineering & Building Technology, Goyang, Korea

Paper number: 20-105

Received: 5 November 2020; Revised: 23 November 2020; Accepted: 23 November 2020

Abstract

The experiment of rip current at successive ends of breaking wave crests was conducted in a laboratory wave basin, and its time-varying evolution according to incident wave durations was observed by using ortho-rectified images. The experiment utilized the generation of a quasi nodal line of the honeycomb-pattern waves (*i.e.*, intersecting wave trains) formed by out-of-phase motion of two piston-type wave makers arranged in the transverse direction, instead of the original honeycomb pattern waves which are generated when two wave trains propagate with slightly different wave directions. The particle moving distance and velocity caused by the rip current were measured by using the particle tracking technique. As a result, the rip current was survived for a while even without incident waves after its generation due to several successive ends of wave crests, and it moved the particles further out to sea.

Keywords: Laboratory experiment, Breaking wave crests, Duration of incident waves, Unsteady rip current, Ortho-rectified image, Particle tracking

연속 쇄파선 끝단 지속시간에 따른 이안류 발달 수리실험 연구

최준우^{a*}

^a한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원

요 지

연속된 쇄파 파봉선 끝단사이로 발달하는 이안류를 수리실험을 통해 재현하고 입사파 지속시간의 변화에 따른 이안류 발달 특성을 정사보정 영상을 통해 관찰하였다. 서로 다른 두 협각의 파랑 중첩에 의해 생성되는 벌집구조 파를 재현하는 대신에 조파장치를 횡방향 두 그룹으로 나누어 역 위상으로 구동시켜 규칙파를 조파하므로 유사 벌집구조 파형을 생성하여 실험을 수행하였다. 수리 실험에서 재현된 이안류의 생성과 발달 과정을 관찰하기 위해 정사보정 영상기반 입자 추적 기법을 사용하였으며, 이를 통해 이동거리와 속도를 관측하였다. 연속된 쇄파선 끝단이 해안으로 입사하여 이안류가 생성되지만, 이안류가 생성된 후 파랑이 더 이상 입사되지 않아도 상당시간 동안 이안류가 발달하여 입자들이 외해로 이동하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 수리실험, 연속 쇄파선 끝단, 입사파 지속시간, 이안류, 정사보정 영상, 파티클 추적

1. 서 론

해운대 해수욕장에서 2009년에 발생한 이안류에 의한 대

규모 인명사고로 이안류는 사람들의 관심을 끌기 시작하였고, 그 후부터 매년 수십에서 수백 명이 안전사고로 구조 조치되고 있다. 이안류는 해안에서 먼 바다 쪽으로 빠르게 이동하는 폭이 좁은 흐름으로, 해운대의 대규모 이안류는 기상상태가 양호한 경우에도 발생하고 단시간에 발생 및 소멸하여 예측이 용이하지 않은 것으로 알려져 있다.

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0772
E-mail: jwchoi@kict.re.kr (J. Choi)

일반적으로 이안류는 연안 수심지형, 비선형파의 상호작용 및 평균자유수면의 불안정성(instability) 등에 기인하여 파랑 에너지가 연안방향으로 강한 비균등성이 형성될 때 발생하는 것으로 이해되고 있다(Dalrymple, 1975, 1978; Tang and Dalrymple, 1989). 즉, 연안방향을 따라 부분적으로 파랑에너지가 낮아지면, 파랑유도 잉여운동량 플럭스(wave-induced excess momentum flux)의 기울기가 발생하고, 그 낮아진 영역을 통하여 외해방향으로 강한 흐름이 발생하게 된다는 것이다(Choi *et al.*, 2012). 최근에는 위상을 포함한 쇄파 스케일의 파력에 따른 연안흐름 연구가 진행되었고(Clark *et al.*, 2012; Feddersen, 2014; Johnson and Pattiaratchi, 2006; Peregrine, 1998, 1999), 다양한 원인에 의해 끊어진 파봉선을 갖는 파의 쇄파에 따른 변동이 이안류를 발생시키는 근본적인 메커니즘(Peregrine, 1998)으로 인식되기 시작했다(Johnson and Pattiaratchi, 2006; Clark *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2015).

해운대 해수욕장의 대규모 이안류는 수치모의 및 관측자료분석 등 다양한 기법을 이용한 연구(Yoon *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2012, Choi *et al.*, 2013; Shin *et al.*, 2014)를 통해 벌집구조 파형(honeycomb wave pattern 또는 intersecting wave trains)에 의해 발생된다고 주장되어 왔다. 즉, 파향이 조금 다른 두 규칙파의 비선형 상호 간섭에 의해 해안에서 벌집구조 파형이 형성될 때, 해안선 직각방향으로 발달되는 노드선 영역을 따라 해안선의 직각방향으로 이안류가 생성된다는 것이다. 위상간의 상호작용으로 발생하는 상대적으로 짧은 파봉선을 갖는 파의 진행과 그에 따른 쇄파대의 파봉선 끝단에서 시작되는 와류를 설명하는 Peregrine (1998)의 이안류 메커니즘을 바탕으로 연구된 Johnson and Pattiaratchi (2006)에서 다방향 입사파 조건의 돌발성 이안류(transient rip current)에 대한 특성을 기술하고 있으며, 벌집구조 파에 의한 이안류는 그 대표적인 전형이라고 할 수 있다. 앞서 해운대 이안류의 특징으로 언급된 단시간에 발생하여 소멸하는 현상의 이유는 벌집구조 파형, 즉 끊어진 쇄파 파봉선을 갖는 입사파가 지속적으로 유지되지 않기 때문이다.

초기 이안류의 수치실험 연구로, Bowen and Inman (1969)은 실험실에서 edge wave에 의해 발생하는 포말대 이안류를 관측하였다. Wind and Vreugdenhil (1986)은 구조물에 의한 이안류 수치실험을 수행하였으며, Haller *et al.* (1997), Haas and Svendsen (2002), Kennedy and Thomas (2004)는 해안선에 평행한 샌드바의 끊어진 채널에 의해 발생하는 이안류를 관측하였다. Castle *et al.* (2010)은 변형된 이동상 지형위에서의 이안류를 실험하였다. 최근까지 입사파에 의한 연안방향 비균등성이 원인이 되어 상대적으로 더 위험한 돌발성이

안류에 대한 실험 연구는 없었다. 그러나 Choi and Rho (2021)는 조파 실험실에서 유사 벌집구조 파형을 생성하는 방법을 제안하고, 쇄파 파봉선 끝단에서 생성되는 와류에 의해 발달하는 이안류를 관측하였다. 제한된 수조에서 다방향 파랑의 조파는 측면 재반사 문제를 발생시키기 때문에 조파장치를 횡방향으로 둘로 나누고, 두 조파판을 역 위상으로 구동시켜 일방향 규칙파를 조파하므로 연속된 파봉선 끝단을 형성시켜 돌발성 이안류를 재현하였다.

본 실험연구에서는 Choi and Rho (2021)가 수행한 수치실험에서 사용한 기법을 사용하여, 앞서 언급한 벌집구조 파형의 입사파가 짧은 기간 유지되는 경우에도 이안류가 위험한 정도로 생성되는 가를 확인하기 위해 수행되었다. 벌집구조 파형 입사파 지속시간의 변화에 따른 이안류 발달 특성을 관찰하기 위해 정사보정 영상기반 입사 추적 기법을 사용하였으며, 이를 통해 이동거리와 속도를 계측하였다.

2. 실험 조건 및 분석방법

2.1 수심 조건

벌집구조 파형과 같은 연속된 쇄파선 끝단사이로 발달하는 이안류를 재현하고, 관측하기 위한 수치실험은 Fig. 1과 같이 전체 길이 40 m, 폭 30 m, 높이 1.2 m의 조파수조에서 수행하였다. 수심지형은 아래의 평형단면 경험식을 사용하여 구성하였다(Dean, 1991).

$$h(x) = Ax^{2/3} \quad (1)$$

여기서 h 는 수심, x 는 해안선부터 외해 쪽으로의 수평거리, 그리고 A 는 평형단면 형상계수이다. 평형단면 지형의 수심을 위해 적용되는 형상계수는 표사의 침강속도에 의해 결정되며, 이는 표사의 입경(D_{50})에 따라 추정할 수 있다(Rouse, 1937).

본 실험 규모에 적합한 지형의 형상계수를 결정하기 위해, 표사입경의 침강속도에 대한 Froude 상사를 적용하였다(Kriebel *et al.*, 1986). 임의의 원형 해안에 대하여 1/10의 축척을 가정하고, 원형표사 $D_{50} = 0.40$ mm의 침강속도에 대하여 Froude 상사를 만족하는 모형의 표사입경 $D_{50} = 0.19$ mm를 가정하였다. 가정된 모형의 표사입경 침강속도(= 2 cm/s)에 해당하는 형상계수($A = 0.097$)를 적용하였다. 평형단면 경험식의 적용 범위인 포말대의 지형 경사는 1:5.6로 구성하였다. 이 경사는 본 연구와 유사한 평형단면 형상계수를 사용한 Choi *et al.* (2018)의 이동상 실험결과로부터 평형상태 포말대의 단면

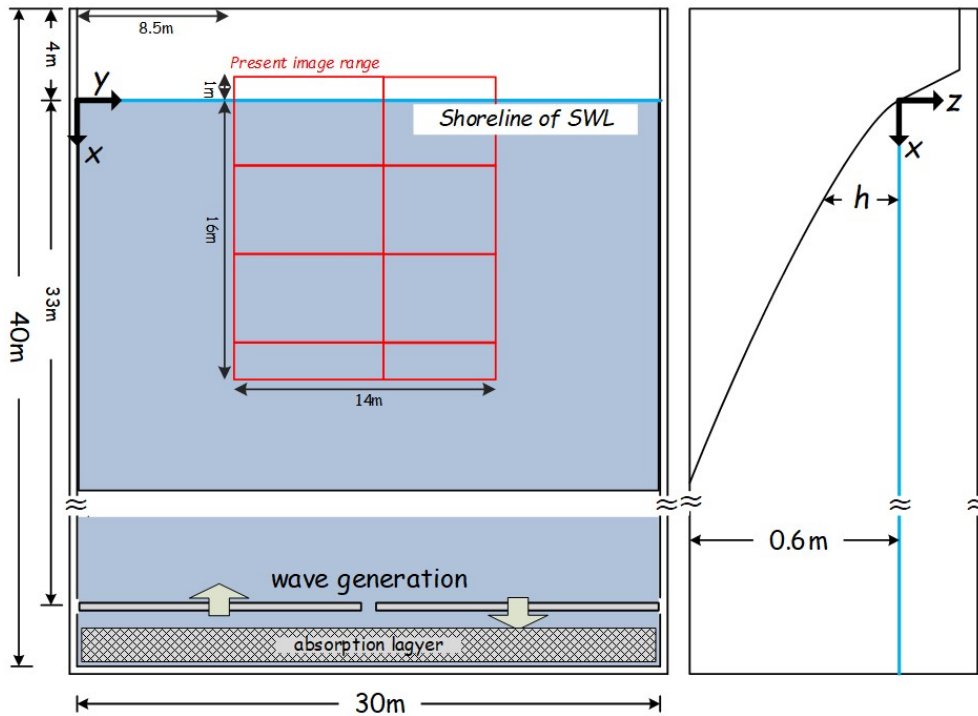


Fig. 1. Sketch of wave basin, wavemaker and experimental bathymetry

경사를 추출한 것이다. 또한 실험조건에서 파랑에 대한 변형을 무시할 수 있는 수심을 60 cm로 가정하여 Fig. 1과 같이 구성하였고, 해안선 방향으로 수심변화를 최소화하여 모형을 제작하였다. 측면 조파장치 단절에 의한 회절 오차를 방지하기 위해 조파장치 폭에 대한 길이방향 수로벽을 설치하였다.

2.2 수리실험 방법

본 수리실험은 별집구조 파형의 노드영역처럼 연속된 쇄파 파봉선 끝단사이로 발달하는 이안류를 재현하고 관찰하는데 그 목적이 있다. 실제 별집구조 파형은 상대적으로 협각으로 진행되는 두 파형의 파랑이 겹쳐 상호 비선형 위상 간섭으로 형성되기 때문에 다방향 조파에 의한 실험이 수행되어야 한다. 그러나 다방향 파랑을 조파할 때 제한적인 측면경계의 반사파 영향 때문에 공간적으로 구별된 별집구조 파형을 생성하기 어렵다. 본 실험연구에서는 실제 별집구조 파형을 생성시키지 않고, Choi and Rho (2021)에서 제안하고 Fig. 1에 도시한 것과 같이 유사 별집구조 파형을 생성하여 실험하였다. 피스톤식 조파장치를 50 cm 간격의 두 그룹으로 나누어 구동할 수 있도록 설정하고, 두 조파기를 서로 역 위상의 규칙파를 조파하여 별집구조 파형과 같은 연속된 파봉선 끝단을 형성시켰다. 유사 별집구조 파형 조파기법의 경우, 실제 별집구조 파형의 노드영역과 다르게 파봉선의 불연속 영역에 의한 회절현상

이 발생하고 이에 따른 파고 변형이 나타나는 차이가 있다. 그럼에도 불구하고 약 20% 상승된 입사파고의 실제 별집구조와 실험영역에 대하여 거의 동일한 결과를 재현하였다(Choi and Rho, 2021). 본 이안류 수리실험에서 사용한 유사 별집구조 파형의 입사 파고와 주기는 $H = 15 \text{ cm}$, $T = 2.4 \text{ s}$ 를 사용하였다.

정사 보정된 영상자료를 이용하여 이안류의 발생과 변화 과정에서 이동하는 입자의 위치를 추적하여 이동거리와 유속을 산정하였다. 이동 입자 촬영을 위해 실험수조 바닥으로부터 약 8 m 높이의 실험실 천장에 총 8대의 카메라를 설치하였다. 각 카메라는 정사보정 오차를 줄이기 위해 관심영역을 수직으로 촬영하도록 설정하였다. 각 카메라는 x 방향으로 약 6 m, y 방향으로 약 8 m의 영역을 촬영하도록 설정하여 관심영역 전체를 포괄할 수 있도록 하였고, 분석한 영상의 범위는 Fig. 1에 제시하였다. 추적 입자는 지름 10 cm의 구멍이 있는 폴리프로필렌 공, 즉 수영장 레인볼을 사용하였다. 상당 부분 수면에 잠겨 이동하기 때문에 물입자 이동에 따른 유속측정에 적합하다고 판단하였다. 조파 전, 해안선 근처에 12개의 입자를 미리 위치시키고 실험을 수행하였다. 완전 구형이 아니기 때문에 얇은 수심에서 바닥과의 마찰로 일부 정체되는 입자들도 있었음을 밝힌다. 촬영 카메라의 기종은 삼성테크윈사의 피쉬아이 타입 카메라(SND-K2083R)이며, 촬영영상의 프레임 구성은 $1920 \times 1080 \text{ pixels}$, 프레임 속도는 60 fps이다. 상기 기술한

조건의 유사 벌집구조 파형 조파를 12 s, 24 s, 36 s 구동한 후 멈추고 각각 약 100 s 동안 추가로 입자이동 영상을 녹화하였고, 추가로 180 s 조파에 따른 실험도 수행하였다. 첫 파의 해안선 도달을 $t = 0$ s로 하여 시간 간격 0.2 s 마다 정사보정 (Heckbert, 1989) 영상을 추출하였고, 이를 이용하여 입사파 주기 2.4 s 마다 각 입자의 위치를 추적하여 이동거리와 속도를 산정하였다.

Kennedy and Thomas (2004)에서 지적하고 있는 것처럼, 추적 입자의 이동속도로부터 계측된 유속은 Lagrangian 유속으로 고정위치의 Eulerian 유속에 Stoke 이동속도 및 쇄파에 의한 물입자 이동속도가 더해진 유속이므로 이에 대한 이해가 필요하다. 그러나 실제 사람이 이안류에 떠밀려 나가는 사고의 유속은 Lagrangian 유속이므로 본 실험의 계측유속이 오히려 더 유의미한 유속일 수 있다.

3. 실험 결과

3.1 이안류에 따른 입자 이동

Fig. 1에 도시한 바와 같이 횡방향 두 그룹으로 나눈 조파기를 서로 역 위상으로 거동시켜 규칙파 $H = 15$ cm, $T = 2.4$ s를 조파하였고, 연속된 파봉선 끝단이 해안선이 입사되어 발달하는 비정상 이안류를 재현하였다. 조파 유지 시간을 12 s, 24 s, 36 s,

180 s로 구동하여 4가지 조건에 대하여 분석하였다. 조파된 파형을 용량식 파고계로 계측하여 Fig. 2에는 12 s 조파 조건의 수면변위를, Fig. 3에는 24 s 조파 조건의 수면변위를 제시하였다. 계측위치는 조파 판에 근접하고, 파봉선 끝단의 노드영역과 떨어져 있는 $x = 30.0$ m, $y = 7.0$ m와 $x = 30.0$ m, $y = 23.0$ m이다. 각 그림에 나타난 것처럼 역위상의 수면변위가 확인되며, 조파 장치 설정에 따라 구동의 시작 및 정지에 완곡부가 존재함을 알 수 있다. 이러한 완곡부 및 입사파 최선단부 회절영향으로 해안선에 도달하는 첫 번째 파는 계획된 파고보다 작음을 밝힌다.

Figs. 4 and 5에 조파된 첫 번째 파의 해안선 도달을 기준으로 $t = 0-35 T$ 동안의 5 T 마다의 영상을 제시하고 있으며, 이를 통해 이안류의 생성 및 발달과정에 따라 조파 이전에 임의로 분포시킨 추적 입자의 이동이 나타나았다. Fig. 4에 180 s 조파 조건의 실험 영상을, Fig. 5에 24 s 조파 조건의 실험 영상을 제시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 12 s, 24 s, 36 s 조파의 경우에는 조파기 정지 후 약 100 s 동안 추가로 입자이동 영상을 녹화하여 분석하였다. 그림으로부터 많은 입자들이 끊어진 파봉선 사이를 통해 쇄파대 밖으로 빠져나와 깊은 수심의 외해로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 횡방향의 위상 차이를 통해 뚜렷한 이안류 흐름 발생을 확인할 수 있다. 특히, Fig. 5에 나타난 24 s 조파 조건의 실험 영상에서는 Fig. 4의 180 s 조파 조건 실험 영상과 다르게 $t = 10 T$ 이후에는 입사파의 입사가

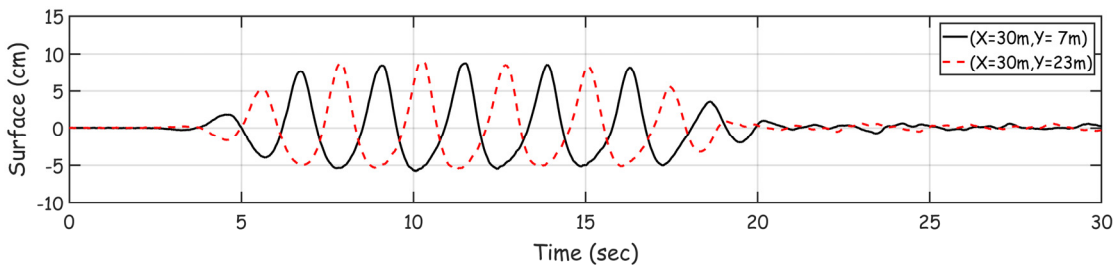


Fig. 2. Time series of the instantaneous water surface displacement of the 5 T -interval incidence of intersecting wave trains of $H = 15$ cm and $T = 2.4$ s at $x = 30.0$ m, $y = 7.0$ m and 23.0 m

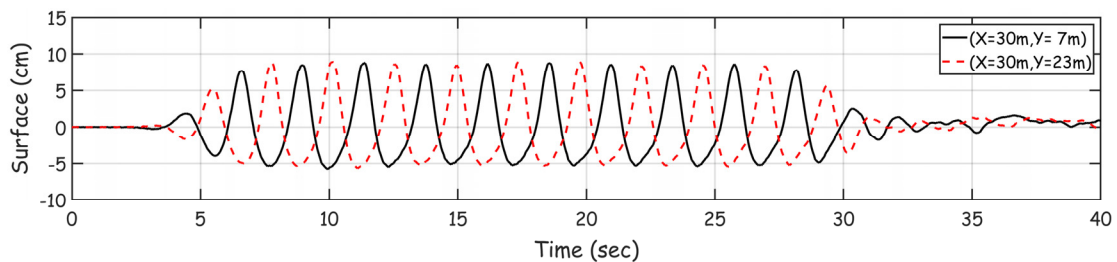


Fig. 3. Time series of the instantaneous water surface displacement of the 10 T -interval incidence of intersecting wave trains of $H = 15$ cm and $T = 2.4$ s at $x = 30.0$ m, $y = 7.0$ m and 23.0 m

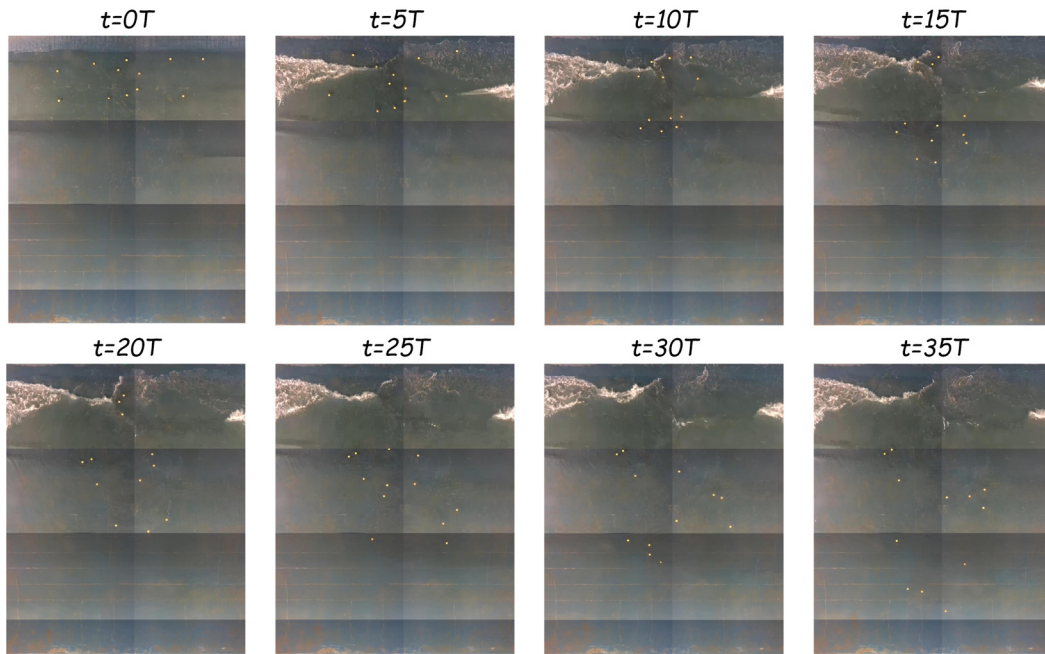


Fig. 4. Snapshots of time-varying particle motions due to the unsteady rip current evolved by the $75T$ -interval incidence of intersecting wave trains of $H=15\text{ cm}$ and $T=2.4\text{ s}$ during $t=0-35T$

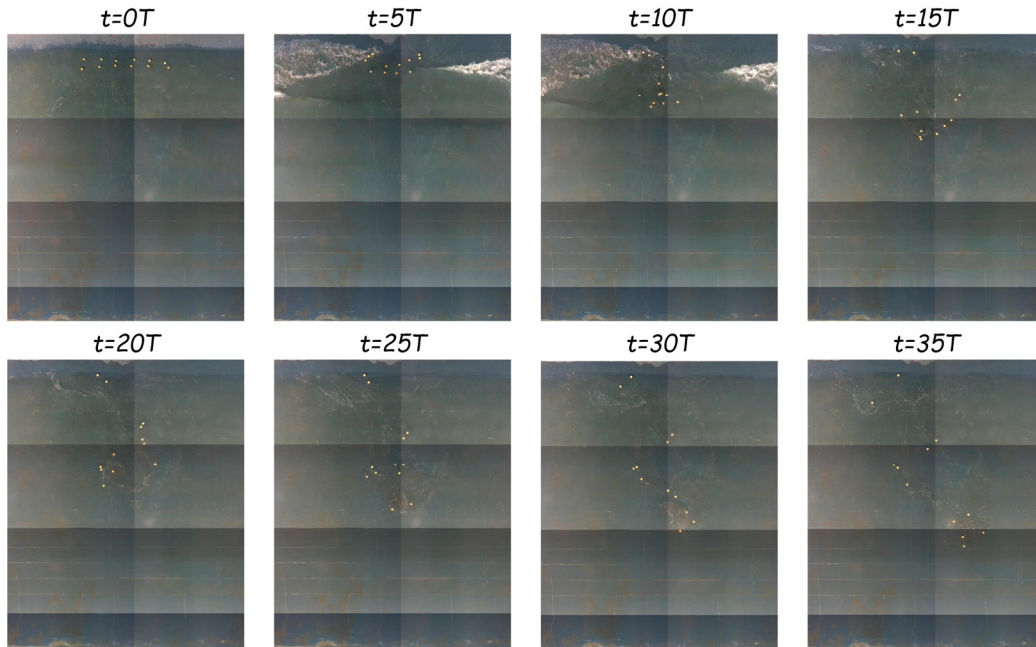


Fig. 5. Snapshots of time-varying particle motions due to the unsteady rip current evolved by the $10T$ -interval incidence of intersecting wave trains of $H=15\text{ cm}$ and $T=2.4\text{ s}$ during $t=0-35T$

없어 쇄파거품이 영상에 나타나지 않는다. $10T$ 이후 영상에서 더 이상 입사파가 해안에 도달하지 않음에도 불구하고 추적 입자들이 상당거리를 이동함을 알 수 있다.

3.2 이안류에 따라 이동하는 입자 추적 궤도

앞 절에 제시된 녹화된 정사보정 영상자료를 기반으로 입자추적을 이용하여 시간에 따라 변화하는 이안류에 의해 이동하는 입자를 추적하여 궤도를 분석하였다. Figs. 6 and 7은 180

s 조파 조건으로 생성 및 발달하는 이안류에 의해 이동하는 입자의 궤적을 시간에 따라 나누어 제시하였다. Fig. 6에는 첫 번째 입사파의 해안선 도착을 기준으로 패널(a)에는 0-10 T , 패널(b)에는 10-20 T , 패널(c)에는 20-30 T 시간동안에 이동한 입자의 궤적이 나타나있다. 패널(a)에는 별집구조 파형의 노드영역에 해당하는 중심 부분으로 feeder current가 생성되어 흐름이 집중되고 이안류가 생성되기 때문에 나타나는 입자 궤도를 확인할 수 있다. 패널(b)에서는 이안류 발달에 따른 입자의 궤적이 확인되며, 초기 위치에 따라 일찍 이안류에 붙잡힌 입자는 이안류 주 흐름영역(rip current neck) 바깥쪽 생성

되는 와류에 의해 회전운동을 하는 것이 나타나고, 늦게 이안류 흐름에 붙잡힌 입자들은 이안류 주 흐름을 따라 이동하며 더 외해로 이동하는 궤도를 볼 수 있다. 패널(c)에서는 기존 이안류 주 흐름에 의해 이동하던 입자는 회전운동을 하고, 입자 크기에 비해 얇은 수심의 초기 위치 때문에 정체되어 있던 입자가 뒤늦게 이안류에 붙잡혀 상대적으로 더 먼 외해로 이동하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에는 첫 번째 입사파의 해안선 도착을 기준으로 패널(a)에는 30-40 T , 패널(b)에는 40-50 T , 패널(c)에는 실험 전체 0-50 T 시간동안에 이동한 입자의 궤적을 나타내었다. 패널(a)와 (b)에서 이안류의 주 흐름영역 바깥쪽

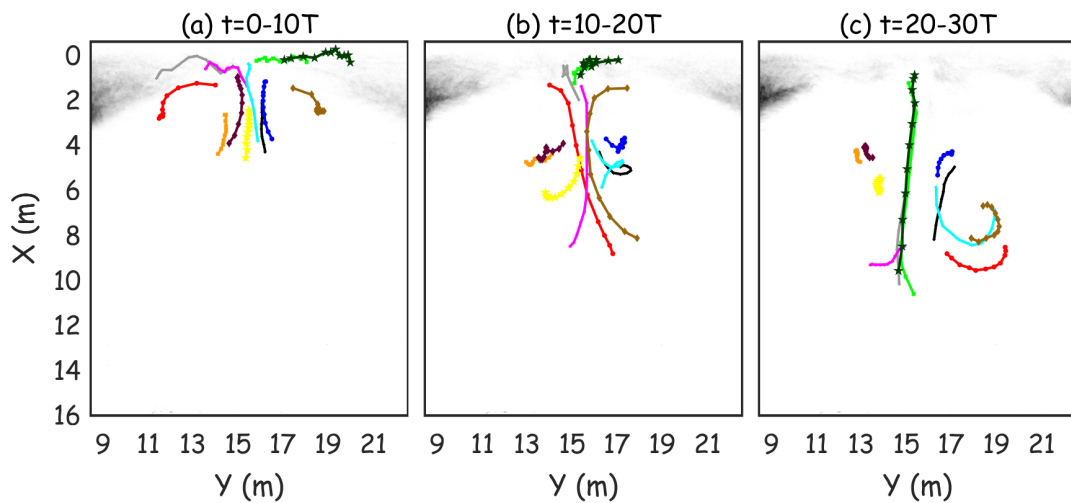


Fig. 6. Trajectories of 12 particles moved by the unsteady rip current evolved by the 75 T -interval incidence of intersecting wave trains of $H=15$ cm and $T=2.4$ s (a) during $t = 0-10T$, (b) during $t = 10-20T$, and (c) during $t = 20-30T$. The gray shade was the average of grayscale images in each of the intervals

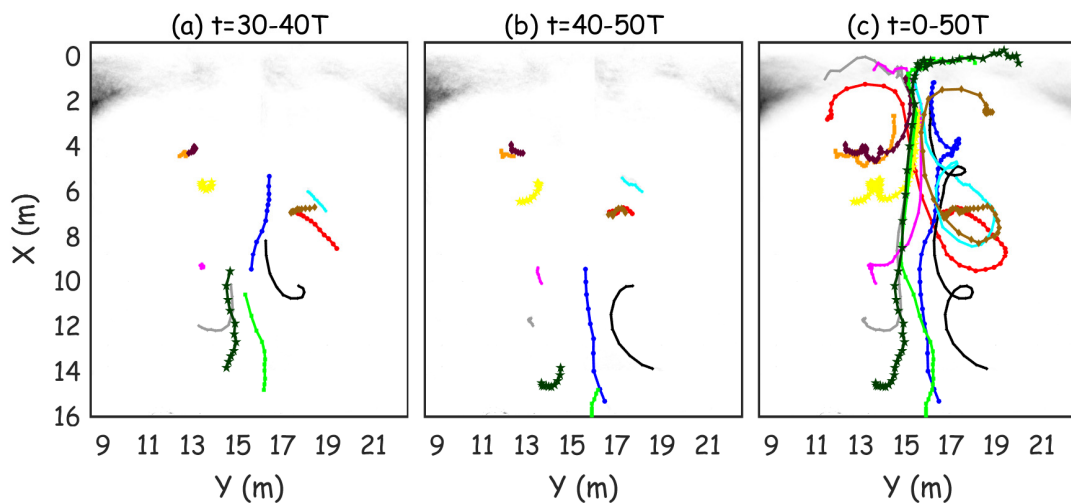


Fig. 7. Trajectories of 12 particles moved by the unsteady rip current evolved by the 75 T -interval incidence of intersecting wave trains of $H=15$ cm and $T=2.4$ s (a) during $t = 30-40T$, (b) during $t = 40-50T$, and (c) during $t = 0-50T$. The gray shade was the average of grayscale images in each of the intervals

으로 이동된 입자들은 회전 운동을 하거나 상대적으로 크지 않은 움직임 보이고, 주 흐름영역 위에 있거나 회전 운동을 통해 다시 주 흐름영역으로 들어온 입자들은 상대적으로 더 외해로 이동하는 궤도를 볼 수 있다. 실험 전체기간 궤적을 나타낸 패널(c)로부터 수렴되는 연안류, 외해로 발달하는 이안류, 흐름분포 경계층에서의 와류발달에 의한 회전운동을 하는 입자들의 이동을 볼 수 있다.

그림에 나타난 궤적이외의 회색음영은 해당 패널이 나타내는 시간간격의 영상 속 흑백성분을 평균한 것으로 강한 쇄파로부터 생성된 흰색 거품 때문에 흑백으로 구별되는 영역이다. 이로부터 대략적인 쇄파대 영역과 각 시간대의 입사파 유무를 알 수 있게 하였다.

Fig. 8에는 12 s 조파 조건으로 생성 및 발달하는 이안류에 의해 이동하는 입자의 궤적을 입사파가 해안에 들어오는 동안과 더 이상 입사파가 해안에 들어오지 않는 동안의 시간으로 나누어 제시하였다. 첫 번째 입사파의 해안선 도착을 기준으로 패널(a)에는 0-8 T , 패널(b)에는 9-24 T , 패널(c)에는 실험 전체 0-24 T 의 시간동안에 이동한 입자의 궤적을 나타내었다. 입사파가 해안에 들어오는 동안의 입자 이동을 제시한 패널(a)에서는 별집구조 파형의 노드영역에 해당하는 중심 부분으로 feeder current가 생성되어 흐름이 집중되기 때문에 나타나는 궤도를 확인할 수 있다. 조파 중단으로 더 이상 입사파가 해안으로 들어오지 않는 기간의 입자 이동을 제시한 패널(b)에서는 상당한 정도의 거리를 이동하는 입자의 궤도가 확인된다. 비록 쇄파되는 파봉선 끝단의 와류 생성이라는 이안류의 원천이 없이도 이미 발달된 와류의 이동, 즉 이안류에 의해 입자들

이 이동하였다. 지속적인 입사파의 공급이 없기 때문에, 즉 이안류의 원천이 없기 때문에 앞선 180 s 조파 조건의 경우와 다르게 이안류의 발달거리는 상대적으로 짧지만, 생성된 와류가 소멸되기 전까지 입자들은 회전 운동을 하며 이동하는 것으로 보인다. 참고로, 모형의 축척을 1/10으로 가정할 때, 실제 해안선으로부터 최대 이동한 해안선 직각방향 거리는 60 m에 이르는 것을 알 수 있다. 이동 중 입자 크기에 비해 얇은 수심의 위치 때문에 정체되어 있는 입자도 있다. 입사파가 없는 기간이기 때문에 패널(b)에는 영상 평균으로 얻어진 흰색 거품에 의한 회색음영이 나타나지 않는다. 조파 및 정지 후까지의 전체 입자 이동을 나타낸 패널(c)로부터 24 s 동안의 연속된 파봉선 끝단의 쇄파로도 상당히 위험한 이안류가 발달되며 이로부터 대부분의 입자들이 외해로 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9에는 24 s 조파 조건의 실험결과를 제시하였다. 이안류에 의해 이동하는 입자의 궤적을 입사파가 해안에 들어오는 동안과 더 이상 입사파가 해안에 들어오지 않는 동안의 시간으로 나누어 제시하였다. 첫 번째 입사파의 해안선 도착을 기준으로 패널(a)에는 0-13 T , 패널(b)에는 14-39 T , 패널(c)에는 실험 전체 기간인 0-39 T 동안에 이동한 입자의 궤적을 나타내었다. 입사파가 해안에 들어오는 동안의 입자 이동을 제시한 패널(a)에서는 노드영역으로 수렴되는 feeder current와 이안류가 발달되기 때문에 나타나는 궤도를 확인할 수 있다. 조파 중단으로 더 이상 입사파가 해안으로 들어오지 않는 기간의 입자 이동을 제시한 패널(b)에서는 180 s 조파 조건보다는 짧지만 12 s 조파 조건보다는 긴 상당한 거리를 이동하는 입자의 궤도가 확인된다. 앞서 언급한 것처럼 지속적인 입사파의 공

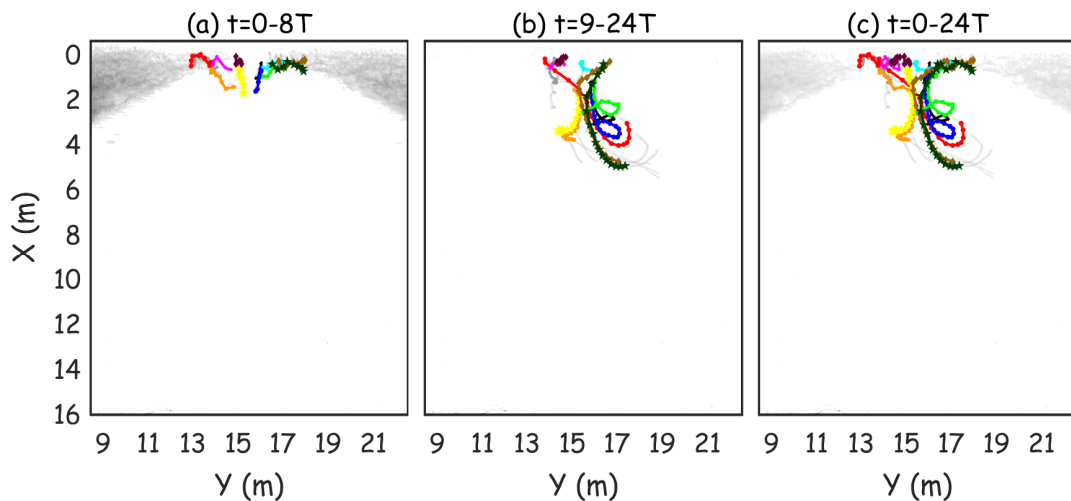


Fig. 8. Trajectories of 12 particles moved by the unsteady rip current evolved by the 5 T -interval incidence of intersecting wave trains of $H=15$ cm and $T=2.4$ s (a) during $t=0-8T$ (with waves), (b) during $t=9-24T$ (after waves), and (c) during $t=0-24T$. The gray shade was the average of grayscale images in each of the intervals

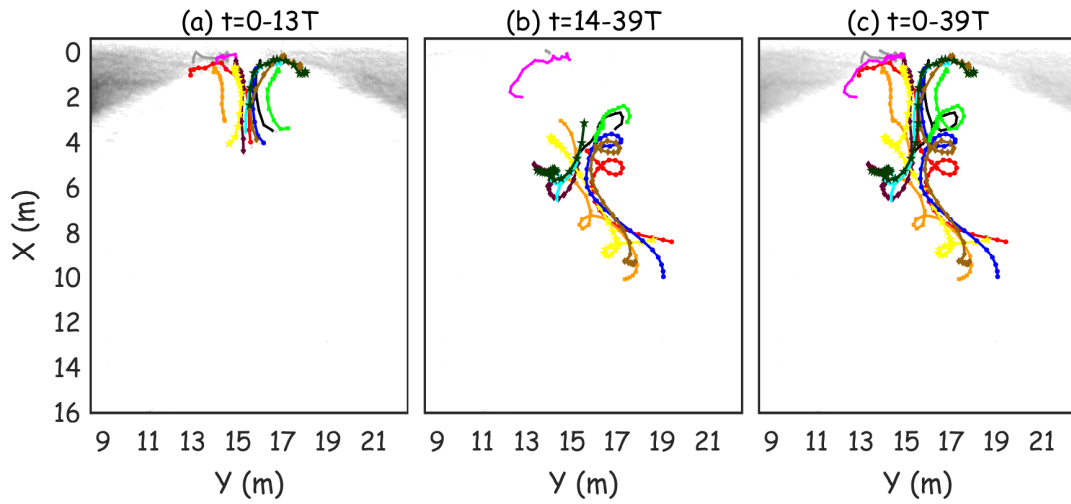


Fig. 9. Trajectories of 12 particles moved by the unsteady rip current evolved by the $10T$ -interval incidence of intersecting wave trains of $H=15$ cm and $T=2.4$ s (a) during $t=0-13T$ (with waves), (b) during $t=14-39T$ (after waves), and (c) during $t=0-39T$. The gray shade was the average of grayscale images in each of the intervals

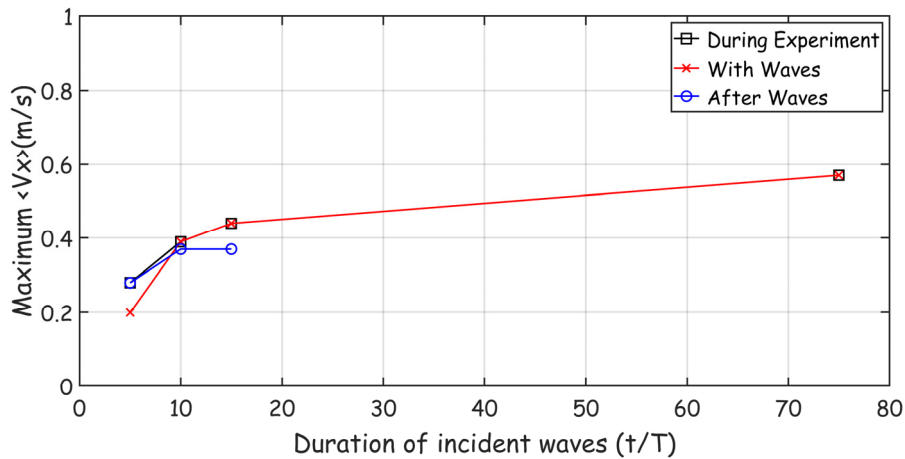


Fig. 10. Maximum velocities of the rip current varied according to the duration of incident intersecting wave trains of $H=15$ cm and $T=2.4$ s

급이 없이도, 즉 쇄파되는 파봉선 끝단의 와류 생성이라는 이안류의 원천이 없이도 이미 발달된 와류의 이동으로 와류가 소멸되기 전까지 입자들을 회전 운동과 함께 이동시켰다. 난류에 의한 에너지 소모로 와류가 완전히 소멸될 때까지는 상당한 시간이 걸리는 것으로 보인다. 앞선 경우와 마찬가지로 패널(b)에는 영상 평균으로 얻어진 흰색 거품에 의한 회색영이 나타나지 않고, 이동 중 입자 크기에 비해 얇은 수심의 위치 때문에 정제되어 있는 입자 및 정제 후 다시 이동하는 입자도 보인다. 패널(c)로부터 24 s 동안의 연속된 파봉선 끝단의 쇄파만으로도 상당한 정도의 이안류가 발달되며 이로부터 대부분의 입자들이 외해로 이동하는 것을 알 수 있다.

앞에서 제시한 2.4 s 즉, T 간격의 입자 위치를 이용하여 이안

류 유속을 산출하였고 입사파 지속 시간에 따라 변화하는 이안류 발달 정도를 나타내기 위해, 조파 지속 시간별 최대 이안류 유속을 추출하여 Fig. 10에 제시하였다. 사각 기호는 전체 실험동안의 최대 이안류 유속을, 곱표 기호는 조파 도중의 최대 이안류 유속을, 원 기호는 조파 중단 후의 최대 이안류 유속을 나타낸다. 12 s ($5T$) 조파 조건에서는 조파 중단 후에 최대 이안류가 발생하고, 24 s ($10T$) 조파 조건에서는 조파 중과 중단 후의 최대 이안류가 유사하며, 그보다 긴 기간의 조파 조건에서는 조파 중에 최대 이안류가 나타난다. 그림으로부터 180 s 입사파 지속조건의 최대 이안류 유속에 대하여 12 s 입사파 지속조건의 최대 이안류 유속이 약 50%에 이른다 것을 알 수 있다. 즉, 그림으로부터 입사파 지속 시간이 길어질수록 최

대 이안류 유속은 증가하지만, 상대적으로 짧은 지속시간의 연속된 파봉선 끝단의 쇄파만으로도 상당한 정도의 이안류가 빠르게 발달됨을 알 수 있다. 또한, 12 s (5 T) 조파조건의 실험으로부터 입사파가 해안에 도달하지 않아 쇄파가 관찰되지 않은 순간에도 이전에 생성된 이안류가 일정기간 유지되어 최대 유속에 도달하는 것도 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

해운대 해수욕장에서 매년 수십에서 수백 명이 안전사고로 구조 조치되고 있다. 해운대 해수욕장에서 별집구조 파형에 의해 발생한다고 알려진 대규모 이안류를 수리실험을 통해 연구하였다. 서로 다른 두 협각의 파랑 중첩에 의해 생성되는 별집구조 파를 재현하는 대신에 Choi and Rho (2021)에서 제안한 조파장치를 횡방향 두 그룹으로 나누어 역 위상으로 구동시켜 생성되는 유사 별집구조 파형을 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 별집구조 파형과 같이 연속된 파봉선 끝단이 해안선으로 입사하며 쇄파할 때, 그 입사파 지속시간에 따른 이안류 발달 특성을 관찰하였다. 수리 실험에서 재현된 이안류의 발달 과정을 관찰하기 위해 정사보정 영상기반 입사 추적 기법을 사용하였으며, 이를 통해 이동거리와 속도를 관측하였다. 입사파 지속시간 조절을 위해 12 s (5 T), 24 s (10 T), 36 s (15 T), 180 s (75 T) 동안 조파기를 구동시켜, 이안류의 생성과 발달에 따라 이동하는 입사 위치를 추적하였다. 연속된 쇄파선 끝단이 해안으로 들어오는 입사파 지속시간이 길어질수록 이안류 유속은 증가하지만, 상대적으로 짧은 지속시간의 연속된 파봉선 끝단의 쇄파만으로도 상당한 정도의 이안류가 빠르게 발달됨을 알 수 있었다. 이러한 이안류에 의해서 입자들은 상당거리를 이동하여 외해로 이동하는 것을 확인하였다. 예를 들어, 5 T 동안 입사파로도, 축척에 따라 실제 해안선으로부터 이동한 해안선 직각방향 거리는 60 m에 이르는 것을 알 수 있었다. 또한, 입사파가 해안에 도달하지 않고 쇄파가 관찰되지 않은 순간에도 이전에 생성된 이안류가 일정기간 발달하고 유지될 수 있음도 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 국립해양조사원의 “실시간 이안류 감시체계 확대 및 운영” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bowen, A., and Inman, D. (1969). “Rip currents 2. Laboratory and field observations.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 74, No. C3, pp. 5479-5490.
- Castelle, B., Michallet, B., Marieu, V., Leckler, F., Dubardier, B., Lambert, A., Berni, C., Bonneton, P., Barthelemy, E., and Bouchette, F. (2010). “Laboratory experiment on rip current circulations over a moveable bed: Drifter measurements.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, C12008.
- Choi, J., Kirby, J.T., and Yoon, S.B. (2015). “Boussinesq modeling of longshore currents in the SandyDuck experiment under directional random wave conditions.” *Coastal Engineering*, Vol. 101, pp. 17-34.
- Choi, J., Park, W.K., Bae, J.S., and Yoon, S.B. (2012). “Numerical study on a dominant mechanism of rip current at Haeundae beach : Honeycomb pattern of waves.” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 32, No. 5B, pp. 321-320.
- Choi, J., and Roh, M. (2021). “A laboratory experiment of rip currents between the ends of breaking wave crests.” *Coastal Engineering*, Vol. 164, 103812, doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103812.
- Choi, J., Roh, M., and Hwang, H.S. (2018). “Observing the laboratory interaction of undertow and non-linear wave motion over barred and non-barred beaches to determine beach profile evolution in the surf zone.” *Journal of Coastal Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1449-1459.
- Choi, J., Shin, C.H., and Yoon, S.B. (2013). “Numerical study on sea state parameters affecting rip current at Haeundae beach: Wave period, height, direction and tidal elevation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 2, pp. 205-218.
- Clark, D.B., Elgar, S., and Raubenheimer, B. (2012). “Vorticity generation by short-crested wave breaking.” *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L24604, doi:10.1029/2012GL054034.
- Dalrymple, R.A. (1975). “A mechanism for rip current generation on an open coast.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, pp. 3485-3487.
- Dalrymple, R.A. (1978). “Rip currents and their causes.” *16th international Conference of Coastal Engineering*, Hamburg, Germany, pp. 1414-1427.
- Dean, R.G. (1991). “Equilibrium beach profiles: Principle and applications.” *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, No. 1, pp. 53-84.
- Fedderson, F. (2014). “The generation of surfzone eddies in a strong alongshore current.” *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 44, pp. 600-617.
- Haas, K.A., and Svendsen, I.A. (2002). “Laboratory measurements of the vertical structure of rip currents.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, C53047.
- Haller, M., Dalrymple, R., and Svendsen, I.A. (1997). “Rip channels and nearshore circulation: Experiments.” *Proceedings of Coastal Dynamics*, pp. 594-603.

- Heckbert, P.S. (1989). *Fundamentals of texture mapping and image warping*, Mather's Thesis, University of California, Berkeley, C.A., U.S.
- Johnson, D., and Pattiaratchi, C. (2006). "Boussinesq modelling of transient rip currents." *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 419-439.
- Kennedy, A.B., and Thomas, D. (2004). "Drifter measurements in a laboratory rip current." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, C08005.
- Kriebel, D.L., Dally, W.R., and Dean, R.G. (1986). "Undistorted froude model for surf zone sediment transport." *Coastal Engineering*, Vol. 20, pp. 1296-1310.
- Peregrine, D.H. (1998). "Surf zone currents." *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, Vol. 10, pp. 295-309.
- Peregrine, D.H. (1999). "Large-scale vorticity generation by breakers in shallow and deep water." *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 18, pp. 403-408.
- Rouse, H. (1937). *Nomogram for the settling velocity of spheres*. National Research Council, Washington, DC, U.S., pp. 57-64.
- Shin, C.H., Noh, H.K., Yoon, S.B., and Choi, J. (2014). "Understanding of rip current generation mechanism at Haeundae Beach of Korea: Honeycomb waves." *Journal of Coastal Research*, Vol. 72, pp. 11-15.
- Tang, E.-S., and Dalrymple, R.A. (1989). "Nearshore circulation: Rip currents and wave groups." *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. Plenum Press, New York, N.Y., U.S., pp. 205-230.
- Wind, H.G., and Vreugdenhil, B.B. (1986). "Rip-current generation near structures." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 171, pp. 459-476.
- Yoon, S.B., Kwon, S.J., Bae, J.S., and Choi, J. (2012). "Investigation of characteristics of rip current at Haeundae beach based on observation analysis and numerical experiments." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 23, No. 4B, pp. 243-251.